

流域山崩與水文地質特性之關聯研究

譚志豪¹、許世孟¹、冀樹勇¹、蘇泰維²、李錦發²、費立沅²

1 財團法人中興顧問社

2 經濟部中央地質調查所

摘要

本研究整合各項流域調查成果，採用定率法結合GIS技術，評估流域內各邊坡單元於特定降雨條件之坡地穩定性隨時間的變化關係，並探討各項水文與地質因子對降雨入滲引致岩屑崩滑行為之影響。分析成果除能預測各邊坡單元在不同重現期降雨條件下之可能崩塌位置及崩塌規模外，亦可由臨界安全係數觀念推估山崩臨界雨量值。研究成果對後續預警準則及保全對策之研擬奠定了良好的基礎。

關鍵詞：崩塌潛勢、定率法、水文地質

Abstract

The objective of the project is on the investigation of the hydrogeology affecting slope stability in the midstream and upstream areas of the watersheds. An effective assessment of regional rainfall-induced landslides using GIS-based deterministic model was presented to investigate the shallow landslides. The landslide susceptibility maps under different rainfall intensities can be useful for predicting the response of regional rainfall-induced landslides. Furthermore, the rainfall thresholds for shallow landslides can be also estimated by the deterministic model. Our preliminary results appear to be useful for shallow landslide hazard assessments in the study area. The results can be as a good reference for the authority to scheme out an early warning system in the future.

Keywords : Landslide Susceptibility, Deterministic Method, Hydrogeology

一、前言

根據歷年的地質災害調查成果顯示，山崩與土石流的發生易受地質、地形與水文環境之影響，具有地域性及重複性。集集大地震後十年，接連的颱風豪雨事件引發數以萬計的山崩與土石流，在台灣各地帶來嚴重的災害。根據相關研究顯示，坡地的水文地質特性為降雨誘發山崩之關鍵因素，實有必要進行詳細的調查評估。過去在流域中、上游山區所進行之水文地質調查與評估工作甚少，本計畫基於中興社在山區所累積之工程經驗與成果，針對計畫流域進行水文地質對坡地穩定性影響之調查評估工作，除藉以強化水文地質調查工作以掌握山區水文地質特性外，更執行一系列山崩與水文地質特性之關聯性研究，所獲成果可提供相關單位研擬減災、治災對策之參考，並可做為國土復育與管理之依據。

二、計畫範圍與研究內容

(一) 計畫範圍

中興社承接經濟部中央地質調查所委辦之「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」，自民國96年6月至97年6月間，已針對大漢溪、大甲溪、濁水溪、虎尾溪、朴子溪等流域進行水文地質對崩塌地穩定之相關調查、試驗、分析與評估工作（第1期96年度計畫）。緊接著於民國97年6月至12月間完成鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪及烏溪等流域之水文地質對坡地穩定性之相關調查、試驗、分析與評估工作（第2期97年度計畫）。自民國98年2月至12月間繼續執行高屏溪、東港溪及知本溪等流域之水文地質對坡地穩定性之相關調查、試驗、分析與評估工作（第2期98年度計畫）。

綜觀第1期96年度至第2期98年度所執行之工作內容，本團隊已針對13個主要流域進行大尺度集水區廣域水文地質進行調查與山崩關聯性分析，並於各主要流域挑選了共計12個重點崩塌地進行小尺度重點崩塌地水文地質監測與分析工作（詳圖1），相關成果極為豐碩。

(二) 研究內容

本研究之整體構想主要針對流域上游地區進行水文地質特性對崩塌影響之相關調查、試驗、分析與評估工作。分年度以流域作為調查單位，針對各主要流域進行大尺度的水文地質鑽探、調查與山崩關聯性分析，並於流域內挑選數個具較高崩塌潛勢與重要保全對象之重點崩塌地進行小尺度的各項水文地質調查試驗、監測與分析。

大尺度集水區水文地質調查與山崩關聯性分析工作係以流域為單位，運用地理資訊系統整合定率式物理模式，探討於降雨入滲條件下表層風化土層內暫態水壓之變動行為，藉以瞭解流域內降雨導致岩屑崩滑之趨勢及各項影響因子對穩定趨勢之影響程度。此外，透過廣域降雨促崩模式評估不同重現週期降雨條件下流域內發生岩屑崩滑之潛勢空間分布，並評估流域內各區域之山崩臨界雨量，成果可供相關單位在研擬預警準則或擬定保全對策時參考。

小尺度重點崩塌地水文地質監測與分析，則於各流域內挑選數個曾經發生崩塌且具有指標意義或保全對象之重點崩塌地為研究對象，進行較詳細的水文地質調查、試驗、監測與分析，以瞭解崩塌地受降雨入滲引致水文地質源匯條件改變進而導致邊坡再次發生不穩定或再次產生岩體滑動之機制。由於小尺度的重點崩塌地調查集中於特定崩塌地內，故調查與分析之精度較為精細，除可彌補大尺度調查分析工作之不足外，亦可針對重點崩塌地進行詳細的水文地質對坡地穩定性之關聯研究，其成果可提供相關業管單位擬定後續監測計畫、建立預警準則或進行整治作業時之參考。

本計畫工作量相當龐大且繁複，完整的工作架構與流程可參考圖2（礙於篇幅，本文以大尺度調查評估成果介紹為主，而小尺度成果請參考相關文獻）。

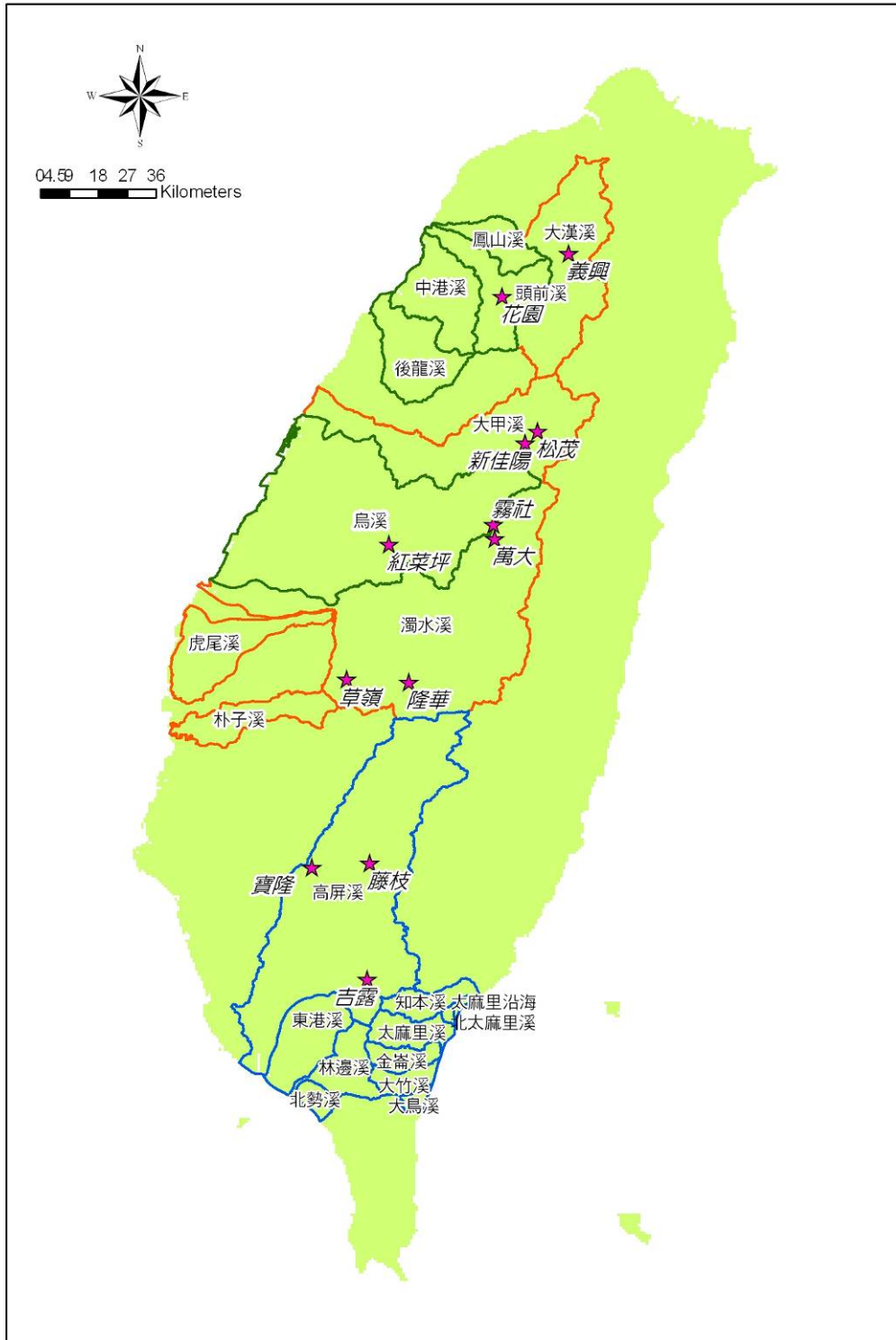


圖 1 本計畫各年度流域範圍與重點崩塌地位置

三、工作方法

(一) 水文分析

台灣地區受到氣候與地理環境因素影響，降雨在時間與空間分布上相當不平均。降雨量多集中在5至10月，佔年平均總雨量78%，各地區雨量分布也不盡相同。若能釐清流域內降雨條件，分析降雨特性之頻率變化，就能利用降雨特性進行山崩關聯性研究。降雨頻率分析係依循「水利署水文分析報告作業須知」之規定，採用年最大降雨序列進行不同延時頻率分析，以常態、二參數對數常態、三參數對數常態、皮爾森III型、對數皮爾森III型及極端值I型等六種機率分布進行分析，並採用卡方檢定法進行機率分布之適合度檢定，以平方差和 (SSE) 及標準誤差值 (SE) 判定機率分布之最適性。又配合本計畫及其他子計畫之工作需要，進一步執行各雨量站不同重現期搭配不同降雨延時之降雨頻率分析，重現期包含2、5、10、20、25、50、100與200年，降雨延時包含1、24、48與72小時。最後將流域內各雨量站降雨頻率分析成果，透過克利金空間內插法，建立流域各重現期不同延時之等雨量分布圖。

(二) 水文地質鑽探

本計畫於各流域內進行水文地質鑽探調查，其目的在於輔助瞭解流域內各地層與地質構造之空間分布及其力學特性。惟由於各流域涵蓋範圍廣大，在有限數量的鑽孔配置下，須訂定適當且較具效益的鑽孔計畫方可達事半功倍之效。本計畫訂定水文地質鑽孔位置時，先就大範圍之工程地質分區進行區分(套用中央地質調查所之1/250,000地質圖幅)，再對照中興工程團隊累積二十餘年之山岳地區工程實績所獲取之既有鑽探資料位置，挑選於較無既有鑽孔資料之地層，布置本計畫之廣域水文地質鑽孔。鑽探除取得岩心試體進行拍照建檔外，並參照中央地質調查所Geo2005地質資料庫之岩心記錄規範建立地層柱狀圖及相關圖資。同時亦將岩土試樣送至試驗室進行室內相關力學與透水試驗。此外，並於岩層可行區段施作現地岩盤透水試驗 (Lugeon test)。

(三) 山區地下水位觀測

當各水文地質鑽孔鑽鑿至預定深度並完成各項現地作業後，本計畫將鑽孔改建置成水位觀測井並依照監測作業計劃，於觀測井內放置自記式電子式水壓自動記錄地下水位變化，並定期派員至現地收取各監測紀錄。各觀測井透過GPS定位系統詳細記錄孔口坐標，可提供後續研究使用。

(四) 土壤厚度調查

土壤厚度調查之目的在瞭解自然邊坡於不同坡度、地形與地質條件下之土壤可能厚度。現地調查採用人工土鑽 (hand auger) 與小型機械傳動式土鑽等兩種設備併行，最大探查深度可達地表下5公尺。調查成果可提供：(1) 建立台灣山區土壤厚度基本資料、(2) 探討土壤厚度與坡度、坡向及地層岩性等因子之關聯性、(3) 提供大尺度廣域降雨引致岩屑崩滑之基本輸入資料。

(五) 降雨促崩潛勢評估

根據歷年來重大颱風豪雨事件之山崩目錄顯示，流域內因颱風豪雨侵襲往往產生為數眾多之岩屑崩滑。處理此類大範圍的山崩問題，傳統針對單一邊坡所進行之穩定分析將受制於現地調查、試驗及監測之規模與數量不足，而無法鉅細靡遺地反應出流域內數以千計的邊坡單元個別的水文與地質特性，導致各項分析無法進行。因此針對流域大範圍山崩問題，實有必要採大尺度廣域的降雨促崩分析模式。

由於過去台灣山區缺乏詳盡的降雨與山崩之關聯統計資料，經評估後，本計畫採用定率式廣域降雨促崩分析模式進行流域內各邊坡於降雨期間之穩定性探討，除可結合計畫範圍內所執行之相關地質鑽探調查、現地試驗與室內試驗成果外，更可將各流域降雨特性研究成果納入考量。本計畫引入美國地質調查所 (USGS) 開發之TRIGRS模式進行廣域降雨促崩分析 (Baum et al., 2002)。該模式可結合地質特性、地下水位、水文地質特性、降雨強度與延時等參數之空間分布差異，求解降雨期間地表風化層之未飽和入滲問題，並進一步透過極限平衡法評估降雨期間集水區各邊坡單元之穩定性變化，模式具有強烈的空間性及依時性。後續應用上，可進一步預測特定降雨分布及延時條件下，流域內各邊坡單元發生崩塌時之規模、位置及其對應之臨界雨量，相關成果可提供後續研擬相關預警機制及保全對策之參考。

TRIGRS 模式全名為暫態降雨入滲網格式廣域邊坡穩定分析模式 (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model)，模式核心乃基於Iverson (2000) 之研究成果發展而來，旨在求解區域內各無限邊坡網格在降雨入滲條件下，邊坡安全係數隨孔隙水壓之變化情形。該模式首先將流域離散成眾多網格單元之組合，而各網格單元之初始地下水位、幾何特性 (如：坡度、土層厚度)、水文地質與力學特性 (如：地表入滲率、透水係數、擴散係數及剪力強度參數等) 及降雨強度延時等參數值均可隨空間或時間設定為不同之分布型態，再透過求解未飽和流動方程式 (Richards equation) 評估降雨入滲對坡地淺層孔隙水壓之影響，即：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\varphi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\varphi) \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

式中， φ 為地下水壓力水頭， θ 為含水量， t 為時間， x 、 y 、 z 分別為三個直角座標方向， α 為坡角， K_x 、 K_y 、 K_z 分別為 x, y, z 三方向之透水係數。

待求得暫態地下水位之分布後，結合極限平衡理論即可求得各邊坡網格於此降雨入滲期間安全係數之變化。TRIGRS模式考慮暫態地下水壓力水頭變化可由下列公式表示，即：

$$\varphi(Z,t) = [Z - d_z]\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_z} H(t-t_n) [D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \\ &+ ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$- 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_z} H(t-t_{n+1}) [D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \\ &+ ierfc \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \end{aligned} \right\}$$

式中， φ 為地下水壓力水頭， Z 軸垂直向下為正， t 為時間，等式右邊第一項 $[Z - d_z]\beta$ 為穩態時之地下水壓力水頭分布，其餘項為暫態地下水壓力水頭分布。 $Z = z/\cos\alpha$ ， z 為垂直坡面方向、 α 為坡角， d_z 為穩態地下水位之深度， d_{LZ} 為不透水邊界沿 Z 軸方向之深度， $\beta = \lambda \cos\alpha$ ， $\lambda = \cos\alpha - (I_z/K_z)_{LT}$ ：沿 Z 軸方向之長期穩態地表流通量， K_z 為沿 Z 軸方向之飽和水力傳導度， I_z 為沿 Z 軸方向之穩態入滲率， I_{nz} 為降雨期間各延時區間之降雨強度， $D_1 = D_0 \cos^2\alpha$ ， D_0 為飽和水力擴散係數， N 為總區間數目， $H(x)$ 為Heavyside步階函數， $ierfc(\eta)$ 為互補誤差函數。而極限平衡法係透過無限邊坡穩定性分析理論，代入坡角 α 、土與水之單位重 γ_s ， γ_w 、暫態地下水壓力水頭 $\varphi(Z,t)$ 及風化土壤剪力強度參數 c 與 ϕ 後，解得各網格單元之崩塌安全係數為：

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} + \frac{c - \varphi(Z,t)\gamma_w \tan\phi}{\gamma_s Z \sin\alpha \cos\alpha} \dots\dots\dots (3)$$

此外，TRIGRS模式又針對Iverson (2000) 之研究成果增加了下列條件限制，以確保入滲期間地下水位不至高出地表，即：

$$\varphi(Z,t) \leq Z\beta \dots\dots\dots (4)$$

進行集水區廣域降雨促崩模式分析時，由於現地調查、試驗及監測之數量往往受限於執行經費與規模而未臻充足，使得模式分析結果可能存在著模型概念化、水文地質參數給定及統計資料運用等階段所產生之不確定性。因此有必要針對模式進行參數率定，以確保模式分析之正確性及準確度。

所謂模式率定係透過反算分析方法找出模式內各地質分區最適當的物理、力學及水文地質參數。模式率定程序係結合最佳化概念反覆修正各參數至誤差縮小至工程可接受之精度為止。誤差估算方式係透過比對模式分析所得之崩塌網格位置與既有暴雨事件誘發之崩塌位置，並透過誤差矩陣法 (Stehman, 1997) 量化模式分析之正確率。

待廣域降雨促崩模式建置完成且相關水文地質及力學參數通過率定後，仍須透過模式驗證以確保模式之正確性及適用性，方可用來預測未來於特定降雨條件下集水區範圍坡地之穩定性與崩塌潛勢。

(六) 山崩臨界雨量評估

以定率法評估山崩臨界雨量之基本原理係將降雨入滲歷程之水文模式與邊坡穩定分析模式相結合，並由邊坡單元之臨界安全係數觀念 ($FS=1$) 反求山崩臨界降雨量。

本計畫利用前述廣域降雨促崩潛勢分析模式，評估流域內各邊坡單元於臨界崩滑狀態下之降雨促崩門檻值。由於流域廣大，從崩塌的條件來看，除與降雨特性有關外，亦與地形、地質、水文地質特性有著密切關係。因此，以流域內降雨分布、地形與地質條件等特性之不同加以分區（例如以徐昇氏雨量站網控制面積為研究單位），進而評估各區域之山崩臨界雨量上、下限值，最終期能達到山崩災害預警及管理的目標。

本計畫評估山崩臨界雨量之程序，首先結合廣域降雨促崩模式之建置、率定與驗證成果，輸入經率定後所得之流域各項參數圖層。再搭配流域內各雨量站長期資料統計所得之雨型分析成果，由小至大逐一輸入不同的累積雨量進行降雨促崩模式分析，藉以評估各控制範圍於不同累積雨量條件下之崩壞比。最終繪製各雨量站網控制範圍內崩壞比隨累積雨量之關係曲線，並由該關係曲線找出崩塌比開始急遽增加時之累積雨量值（視為臨界雨量下限值）及崩塌比開始趨於穩定時（達極限崩塌比）之累積雨量值（視為臨界雨量上限值），即可獲得各區域之山崩臨界雨量建議值。

(七) 重點崩塌地調查、試驗、監測與分析

本計畫於各年度均挑選數個重點崩塌地進行一系列之鑽探、調查、試驗、監測及模式分析工作，除掌握特定崩塌地之基本水文地質資訊外，更進一步研究其滑動機制及其再崩潛勢，以提供後續預警機制及保全對策研擬之參考。

有關重點崩塌地各項調查試驗工作之詳細內容與成果，礙於本文篇幅有限，可參考本計畫各年度成果報告，抑或參考本次研討會論文集另一篇著作「颱風引致山崩之調查、監測與模式分析」，內有精要的摘錄與剖析。

四、研究成果

(一) 水文分析成果

依據前述降雨頻率分析方法，可獲得各流域之不同重現期各降雨延時之降雨量空間分布。本文以98年度針對高屏溪、東港溪、知本溪等流域進行降雨頻率分析所求得之200年重現期24小時延時之降雨量分布為例，說明各流域之降雨特性差異（如圖3所示）。此次莫拉克颱風侵台期間，多處雨量站雨量資料均顯示莫拉克颱風所夾帶之超大豪雨已超過200年重現期之單日累積雨量，為造成數以萬計山崩、土石流發生之重要原因之一。

(二) 地質鑽探成果

為瞭解各流域中、上游地區各代表性地層之地質特性、地下水位狀況及相關物理、力學特性，本研究根據所擬訂之水文地質鑽探計畫進行地質鑽探

調查。自96年至今，分別在大漢溪、大甲溪、濁水溪、鳳山溪、頭前溪、中港溪、後龍溪、烏溪、高屏溪及知本溪等流域計畫範圍內進行廣域水文地質鑽探，孔深35~50m不等。大部分的鑽孔完成鑽探取樣及現地試驗後，多改置為地下水位觀測井，長期量測地下水位變化。

圖4為截至98年度為止，本計畫所布設之鑽孔孔位及地下水位觀測井之分布位置。所有鑽探岩心照片、井錄及相關資料均已建置成Geo2005格式並上傳資料庫，可至中央地質調查所網站參考查詢。

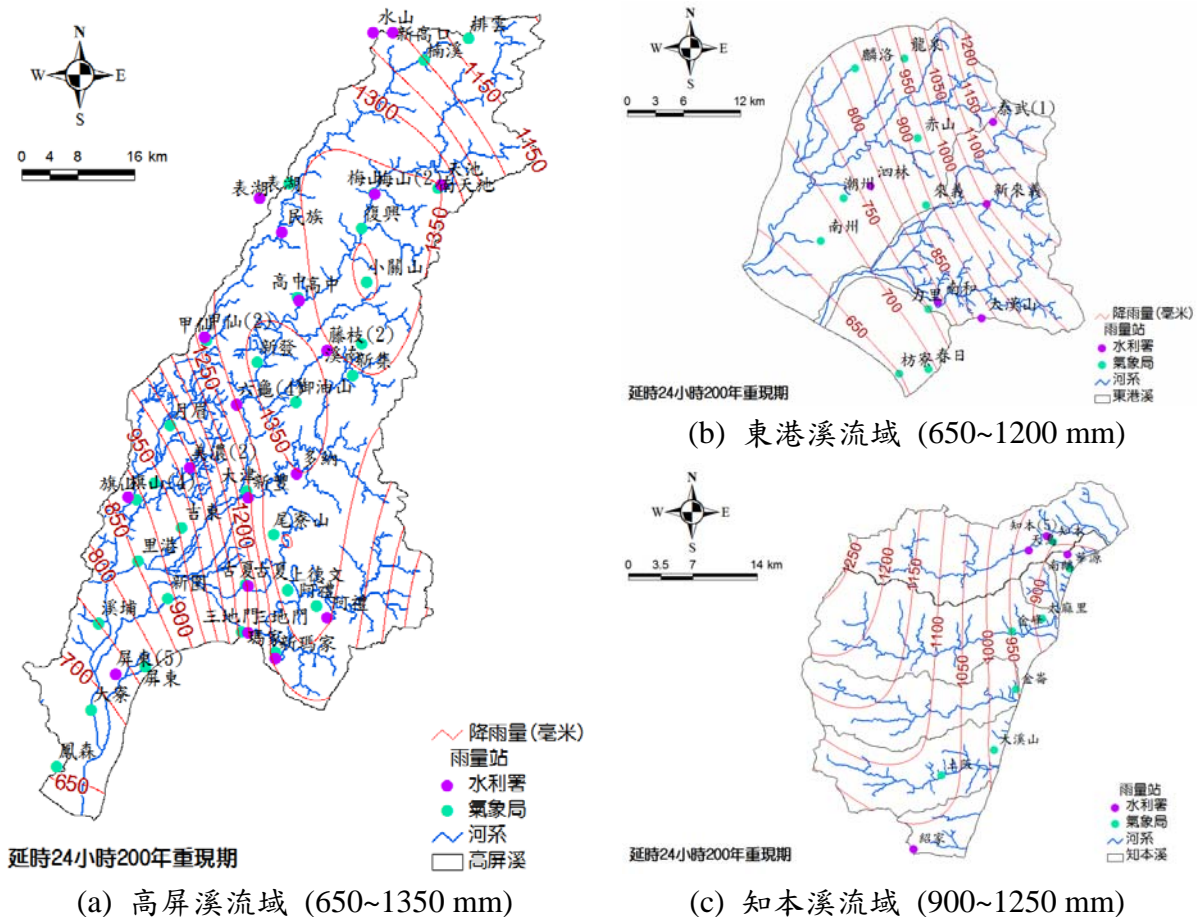


圖 3 計畫範圍各流域 200 年重現期 24 小時延時降雨量之空間分布

(三) 山區地下水位觀測成果

自96年度起至今，本研究陸續於各流域設置共計有51孔水位觀測井，各觀測井隨季節豐枯變化及短期暴雨影響，地下水位皆有所起伏。各觀測井水位經初步均化處理後，可獲得各觀測井常時地下水位高程 z_w 與井口高程 z 之關係，呈現良好的線性關係。

又再蒐集98年度研究區域內其他工程之14孔觀測井資料（曾文水庫越域引水工程）一併納入統計（共計65孔），發現同樣有著類似的關係，經迴歸後獲得山區地下水位與井口高程之線性關係式為：

$$z_w = 0.98z - 8.95 \quad (r^2 = 0.99) \dots\dots\dots (5)$$

以上統計成果雖未針對豐、枯期季節差異及颱風事件對地下水位之影響進行特別考量與處理，但初步成果仍可作為山區地下水位分布之初步參考。對於後續計畫若需布設地下水位觀測井、或是建置水文地質概念模型時給定初始地下水位，均提供初步的研判資訊。

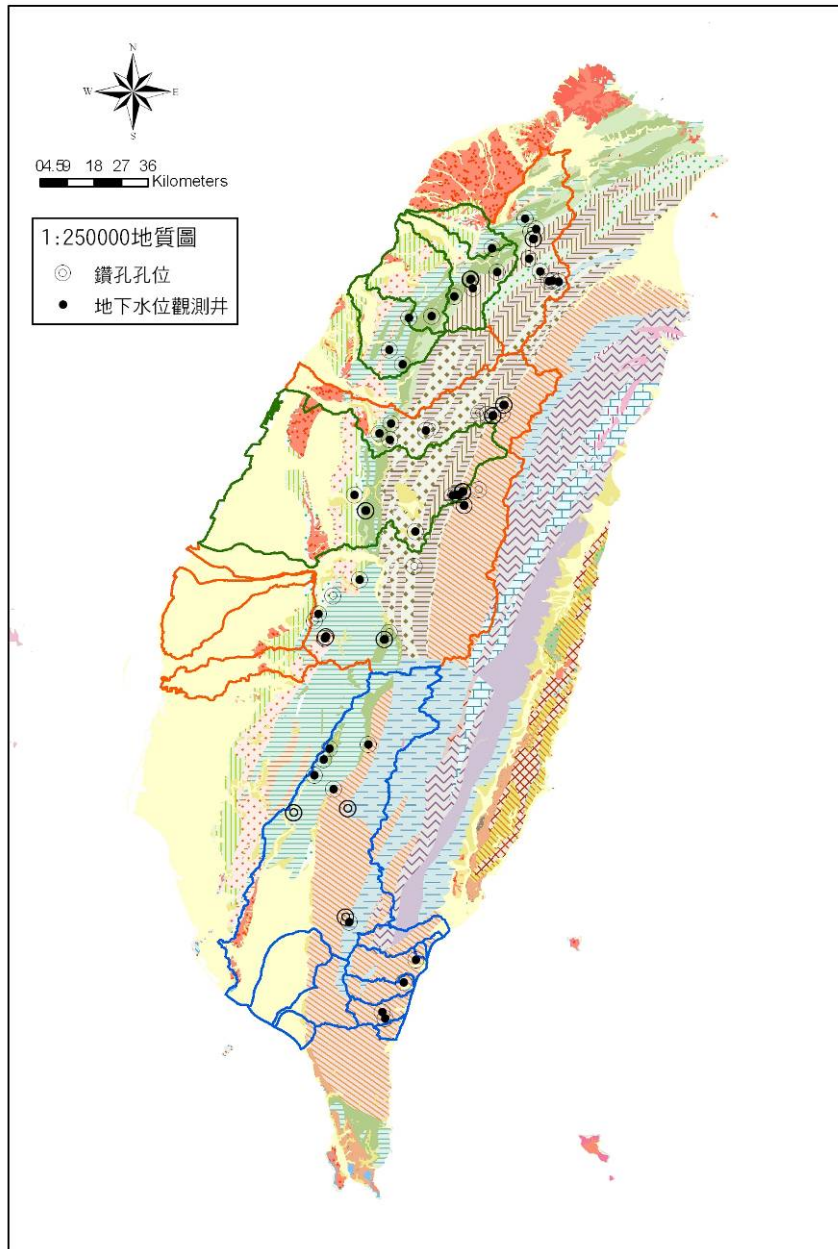


圖 4 各流域水文地質鑽孔及地下水位觀測井佈置圖

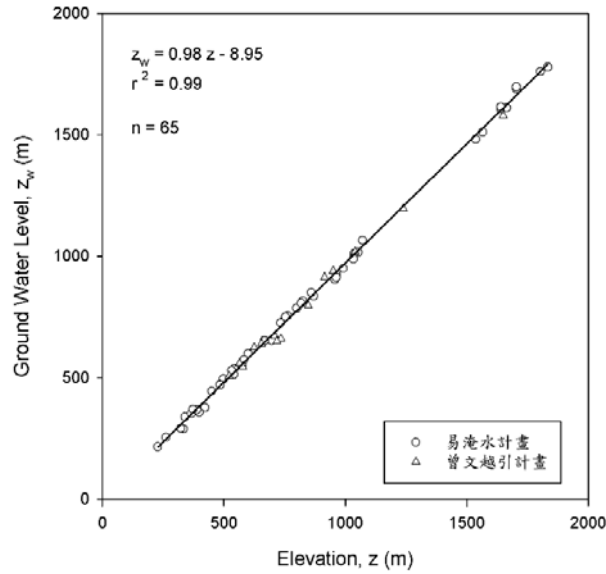


圖 5 台灣山區地下水位與井口高程之迴歸關係

(四) 土壤厚度調查成果

本研究自96年度起陸續於計畫區域各流域內進行土壤厚度調查，至98年底已累積進行了500處調查點位。點位分布於各流域中、上游山區。由過去相關研究得知，影響自然邊坡土壤厚度之因素主要有坡度、岩性、坡向等。調查成果經初步的相關係數與變異係數分析後得知，坡向、地層對土壤厚度之關聯性屬輕度關聯，而土壤厚度與坡度具有較強烈的關聯性。

圖6為本研究分別於96、97、98年度執行之土壤厚度調查與其調查點位所對應坡度之迴歸關係曲線。顯示土壤厚度與坡度具自然對數關係，坡度越小土壤厚度越大。又各年度所執行之調查成果迴歸曲線存在著差異，顯示各流域自然邊坡之土壤仍受其他次要因素影響而具略有差異。

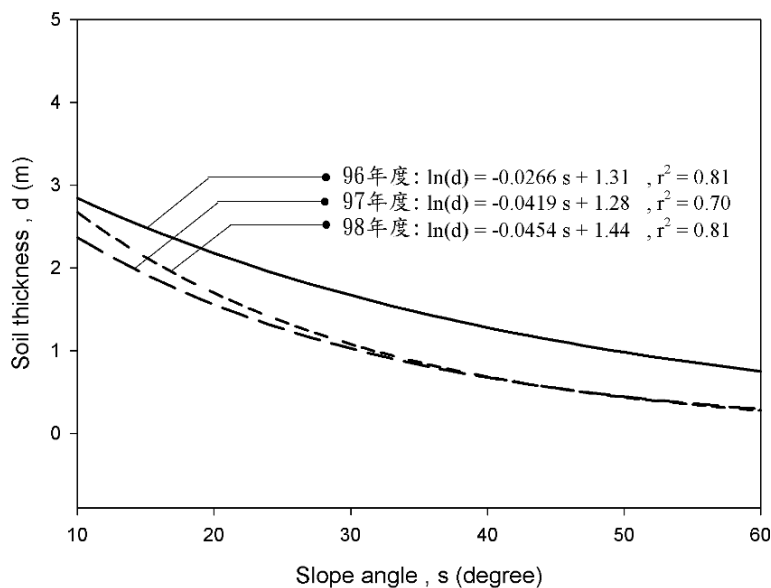


圖 6 台灣山區土壤厚度與坡度之迴歸關係

(五) 降雨促崩潛勢評估成果

針對96至98年度各計畫範圍所進行之降雨促崩潛勢評估成果整理如圖7所示。各流域高潛勢地區占該流域總面積之比例關係如圖8所示，成果顯示濁水溪流域內高山崩潛勢區域所占比率較大，而烏溪流域高潛勢面積比例較小，惟該結果並未對各流域坡地面積作正規化權重調整，此結果較凸顯各流域發生降雨促崩災害之嚴重程度，方能針對問題處理。

又以98年度研究範圍高屏溪、東港溪與知本溪等流域為例，完成前述廣域降雨促崩模式之建置與率定後，可進一步評估高屏地區在200年重現期一日累積雨量之降雨條件下，淺層風化層發生岩屑崩滑之潛勢分布。評估成果顯示高潛勢區域占總流域面積之比率為6.54%；中高潛勢區域占34.47%；中潛勢區域占15.80%；低潛勢區域占43.19%。其中，高潛勢與中高潛勢地區主要集中在坡度介於55%-100%之邊坡（詳圖9、圖10。圖10為圖9之特定區域放大圖）。

由於本次莫拉克颱風之單日累積雨量在高屏地區普遍超過200年重現期一日累積雨量，故可初步透過莫拉克颱風驗證本模式潛勢預測之正確性。圖10(a)~(d)顯示絕大多數山崩發生位置均落於模式預測之高潛勢及中高潛勢區域，初步驗證本模式之正確性與準確度均在工程上可接受的程度。

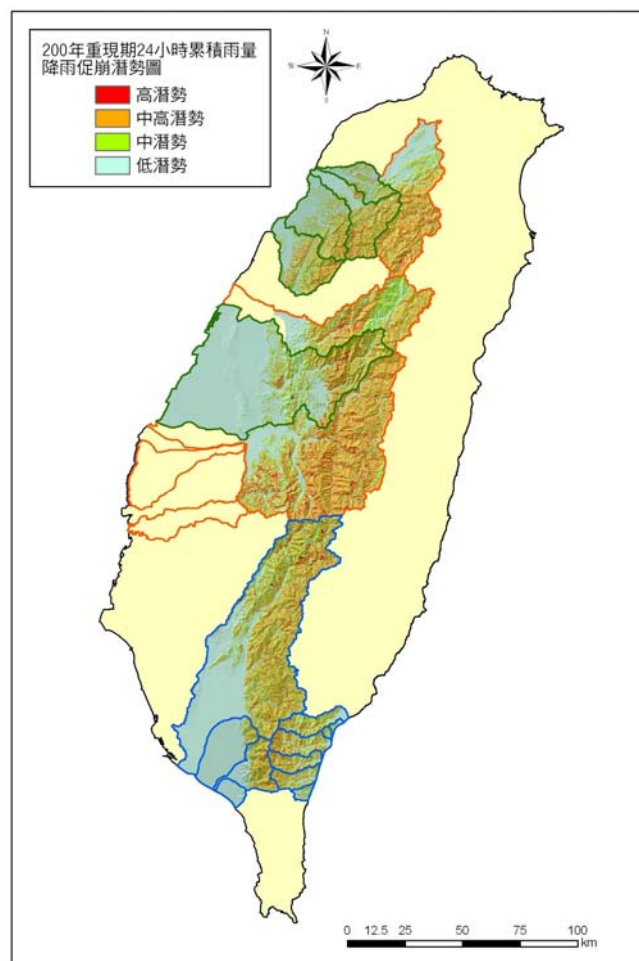


圖7 各流域200年重現期24小時累積雨量之降雨促崩潛勢空間分布

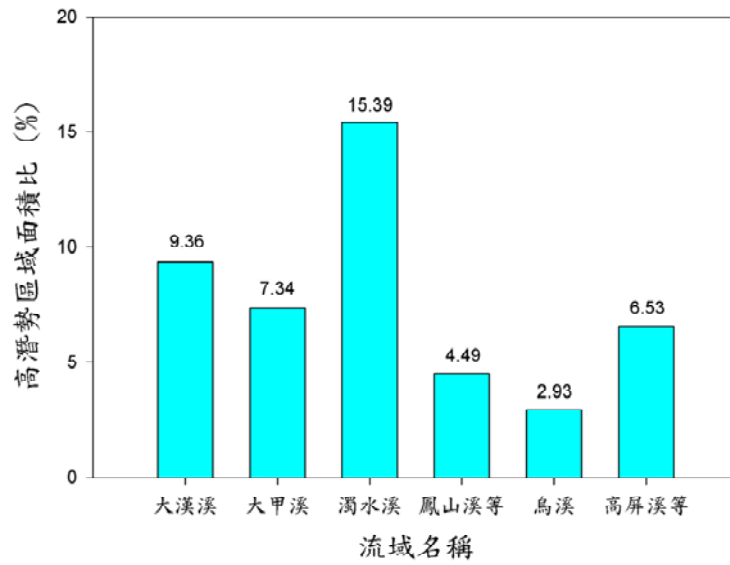


圖 8 各流域山崩高潛勢區域所占面積比率之比較

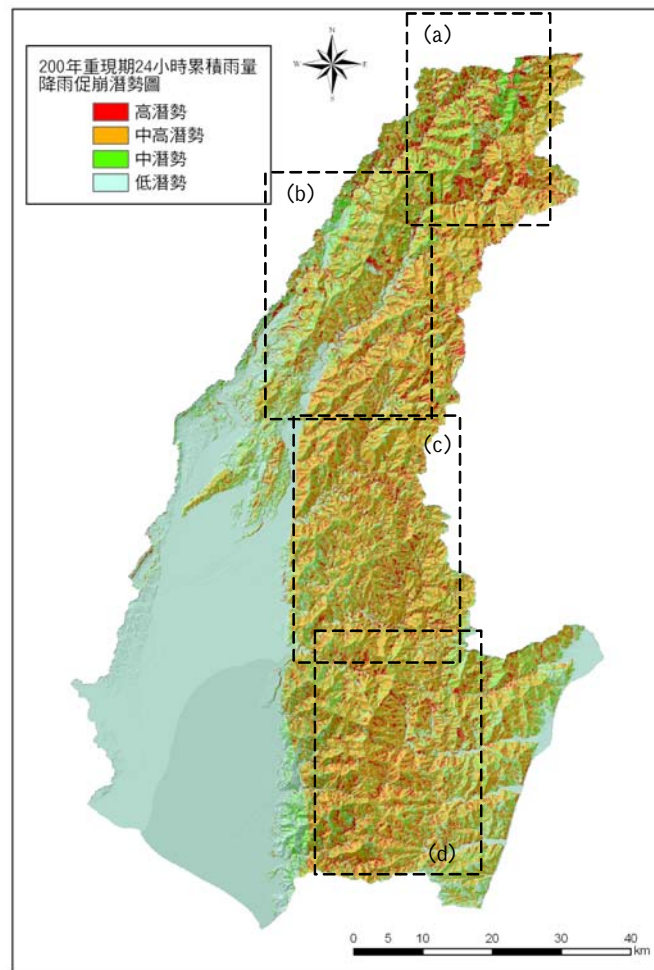
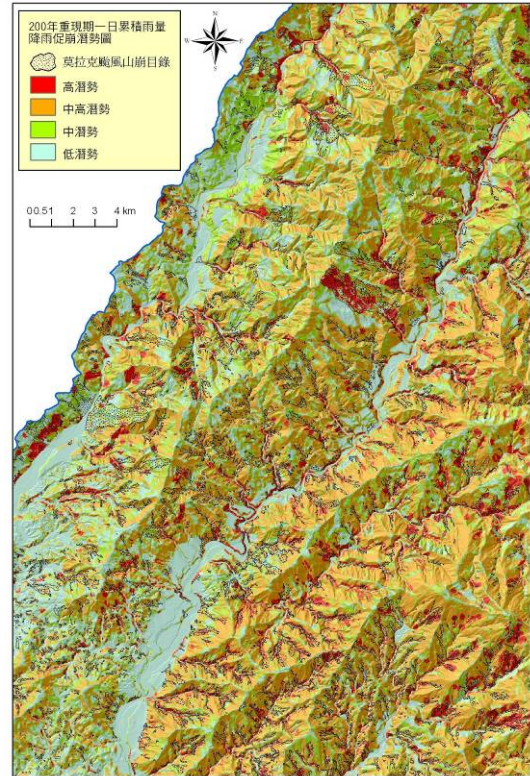
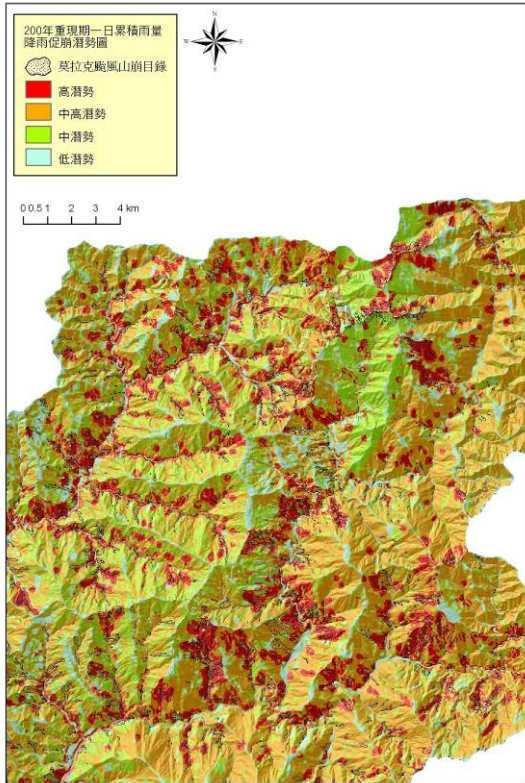
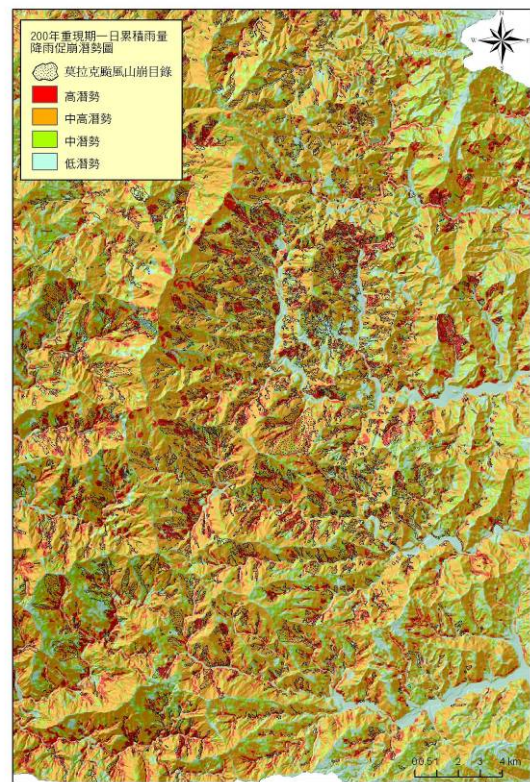
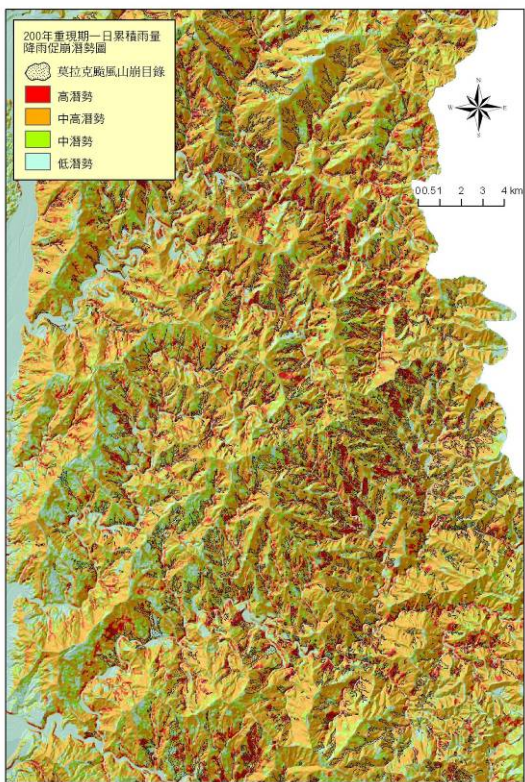


圖 9 高屏地區降雨促崩潛勢分布 (200 年重現期一日累積雨量)



(a) 莫拉克颱風山崩目錄套疊 (圖 9 視框 a) (b) 莫拉克颱風山崩目錄套疊 (圖 9 視框 b)



(c) 莫拉克颱風山崩目錄套疊 (圖 9 視框 c) (d) 莫拉克颱風山崩目錄套疊 (圖 9 視框 d)

圖 10 以莫拉克颱風山崩目錄驗證高屏地區降雨促崩潛勢評估成果

(六) 山崩臨界雨量評估成果

透過前述山崩臨界雨量評估方法，可推估各流域之山崩臨界雨量上、下限值。以98年度高屏地區為例，各徐昇氏雨量站網控制面積內 (Thiessen polygon) 之山崩臨界雨量上、下限建議值如圖11所示。

以高屏溪流流域藤枝雨量站控制範圍為例 (圖11中標註處)，評估結果顯示該區域之山崩臨界雨量介於145~505 mm之間。為驗證評估成果之合理性與準確度，又進一步參照本研究於該區域內的藤枝崩塌地所進行之即時監測紀錄。按照各監測設備的損壞時間順序研判，藤枝崩塌地於莫拉克颱風侵襲期間，自坡址至坡頂逐步開始發生崩滑。又根據倖存的監測儀器紀錄顯示，當坡頂監測儀器也已開始破壞之時間約在2009年8月9日00點00分，對應當時之累積雨量已達1360 mm。再對照本研究針對藤枝崩塌地之小尺度模式分析成果 (詳見相關報告及論文)，藤枝崩塌地於莫拉克颱風期間坡址開始發生崩滑之累積雨量門檻值為190 mm，而發生全面破壞的累積雨量為515 mm。

本研究分別透過大尺度與小尺度之分析方法與工具，所獲得的山崩臨界雨量成果相當一致，並獲得監測紀錄的佐證。上述成果初步驗證廣域分析之正確性及合理性。

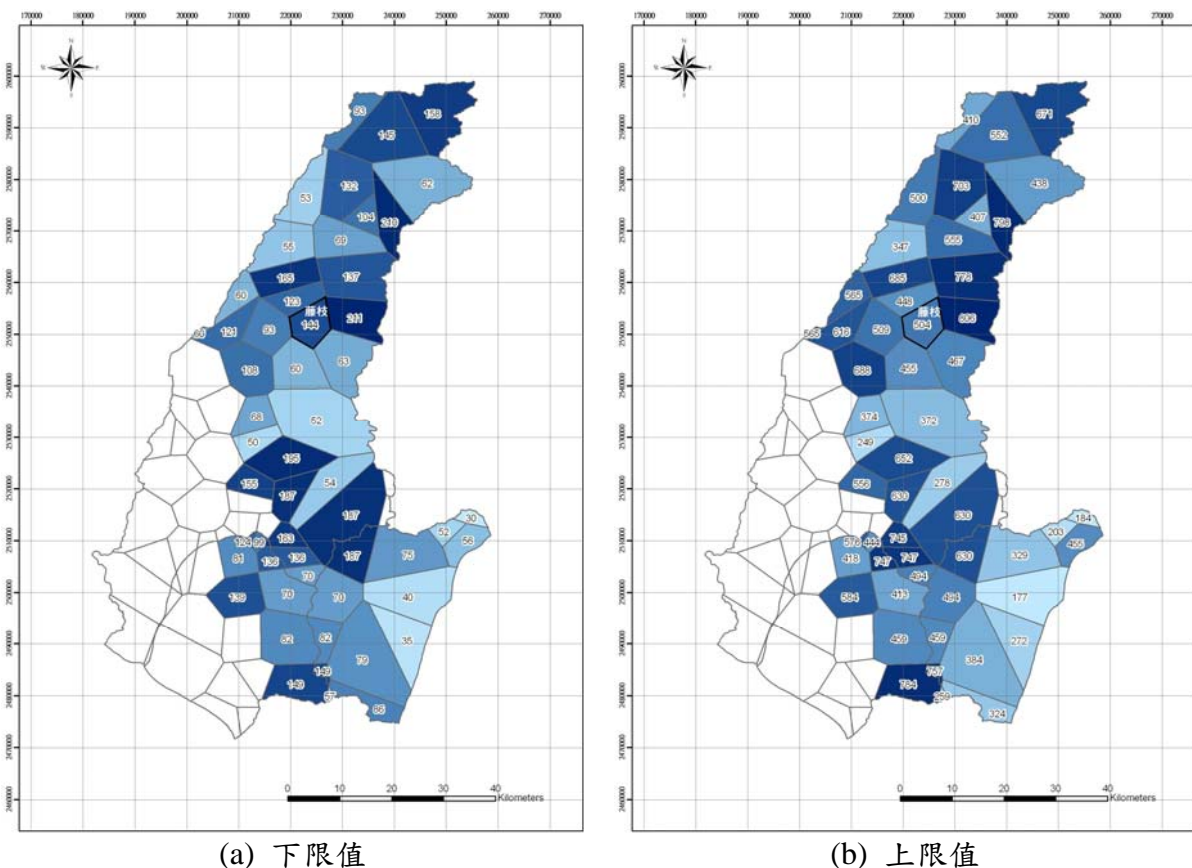


圖 11 高屏溪、東港溪與知本溪等流域之山崩臨界雨量建議值

五、結論

1. 本研究分年度針對不同流域山區進行一系列水文地質對坡地穩定性影響之調查評估工作，成果豐碩，可提供各界參考運用。
2. 針對大尺度調查評估部分，本研究採用定率法進行流域降雨促崩潛勢分析，並評估山崩臨界雨量。模式可考量地形、暫態地下水位、風化土層厚度、力學與水文地質特性、降雨在空間與時間分布等因子，故能有效評估因降雨入滲所引致之岩屑崩滑問題。
3. 本文以高屏地區為研究案例，並以多場颱風事件率定模式。又特別針對莫拉克颱風所造成之山崩進行模式驗證。率定與驗證成果顯示模式預測成效良好，正確率普遍可達 60% 以上。
4. 本文採用 200 年重現期一日累積雨量資料進行流域山崩潛勢預測及山崩臨界雨量評估，除獲得該流域於此降雨條件下之可能崩塌位置及崩塌規模等資訊外，亦可藉以預測流域山崩臨界雨量值上、下限值，對於後續建立相關預警準則及擬訂保全對策奠定了良好的基礎。

誌謝

本研究承蒙經濟部中央地質調查所提供相關研究經費與技術協助，以及各子計畫團隊提供整合資源，在此致上誠摯謝意。對於中興工程顧問社團隊同仁工作期間的努力付出，亦一併致上最深的感謝。

參考文獻

1. 財團法人中興工程顧問社 (2007, 2008, 2009), 「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置-集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」, 計畫成果報告, 經濟部中央地質調查所。
2. 譚志豪、陳嬋璇、冀樹勇 (2009), 「以定率法評估集水區山崩臨界雨量」, 中興工程, 第 105 期, 第 5-16 頁。
3. 鍾明劍、譚志豪、陳嬋璇、冀樹勇、蘇泰維、李錦發、費立沅 (2009), 「松茂崩塌地降雨促崩潛勢評估與監測驗證」, 2009 海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會, 台灣台中。
4. Baum, R.L., Savage, W.Z. & Godt J.W. (2002) TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability Analysis, U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424.
5. Iverson, R.M. (2000) Landslide Triggering by Rain Infiltration, Water Resour Res., 36(7), pp. 1897-1910.